

УДК 624.012.454:669.018

**ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПОГАШЕНИЯ УСИЛИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ РАСТЯНУТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СТАДИИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ**

канд. техн. наук, доц. Ю.В. ПОПКОВ, А.А. ХОТЬКО  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлен анализ состояний железобетонного элемента при взаимодействии внешних и внутренних усилий, в котором показана физическая сущность процессов погашения усилий предварительного напряжения с точки зрения потенциальной энергии упругодеформируемого тела*

Усилия предварительного напряжения арматуры, сохраняющиеся в конструкции, рекомендуется учитывать в расчетах [1, 2] как постоянные внешние сжимающие силы. Относительная величина этих сил может быть весьма значительной, существенно влияющей на работу железобетонного элемента под нагрузками. Поэтому точное определение количественных значений предварительных напряжений в арматуре и бетоне на разных стадиях напряженно-деформированного состояния конструкций является одной из главных задач их расчета на прочность, жесткость и трещиностойкость.

Рассматривая зависимость напряжений и деформаций в арматуре растянутой грани железобетонных элементов при разных уровнях предварительного напряжения и эксцентриситетах внешних продольных сил, С.А. Дмитриев [3] (рис. 1) выделяет области (линии  $1_1 - 1 - 1'$ ;  $2_1 - 2 - 2'$ ), которые соответствуют развитию деформаций в упругой стадии диаграммы « $\sigma_s - \varepsilon_s$ ». В этих областях (случаи малых эксцентриситетов) усилие предварительного напряжения в арматуре  $P = \delta_{sp} A_s$  практически является постоянным, как заключает автор, зависящим от заданной величины предварительного напряжения. При этих условиях значение  $P$  предлагается рассматривать как дополнительную постоянную силу, взаимодействующую с внешней нагрузкой  $N$ . В области больших эксцентриситетов предварительное напряжение арматуры погашается и для  $e = e_{гр}$  полностью исчезает (участки  $1' - КП_1$  и  $2' - КП_2$ ). В данных случаях усилие предварительного напряжения в арматуре может быть принято за внешнюю силу, характеризующую остаточным предварительным напряжением, постоянным лишь для каждого значения эксцентриситета  $e$ . При изменении эксцентриситета значение остаточного предварительного напряжения меняется и может рассматриваться как дополнительная переменная внешняя сила.

Аналогичная схема изменения напряжений возникает и для элементов с многорядным расположением стержней арматуры по высоте сечения. Для каждого ряда стержней, расположенных в растянутой или менее сжатой зоне, предварительное напряжение будет погашено в большей или меньшей мере. В предельном состоянии элементов (рис. 2), как показано в работе В.М. Баташева [4], предварительное напряжение распределенной арматуры может сохраниться полностью (участок 0 – 1), если ни в одном из стержней не появится пластическая деформация, может погаситься частично (участок 1 – 2) или полностью (участок 2 – 3) в части стержней растянутой зоны, что определяется положением данного стержня относительно нейтральной оси и величиной пластических деформаций арматурной стали.

Диаграмма распределения усилий сопротивления осевому растяжению предварительно напряженного железобетонного элемента, представленная В.В. Михайловым [5], описывается кривой  $O_p - A - B$  (рис. 3). В начальном состоянии, когда нет внешней растягивающей силы, усилие растяжения в арматуре ( $A_p$ ) уравнивается усилием сжатия бетона ( $A_c$ ). Приложенная к элементу внешняя растягивающая сила увеличивает усилие растяжения арматуры по линии  $A_p - A$ , в то время как усилие сжатия бетона убывает по линии  $A_c - O$ . В любой точке диаграммы увеличения нагрузки, вызывающей деформацию  $O_p - O_c$ , внешнее усилие  $O_c - D$  воспринимается и уравнивается сопротивлением предварительно напряженной арматуры. При этом всегда существуют усилия обжатия бетона и части предварительного растяжения арматуры, показанные на диаграмме (см. рис. 3) знаками минус (–) и плюс (+), которые характеризуют степень использования искусственно созданного предварительного напряжения. Рассматривая эти усилия как внутренние взаимно уравнивающиеся и не имеющие прямого отношения к внешней нагрузке, устанавливается в работе [5], что эта нагрузка во всем диапазоне деформаций  $O_p - O$  непосредственно уравнивается усилием растяжения арматуры.

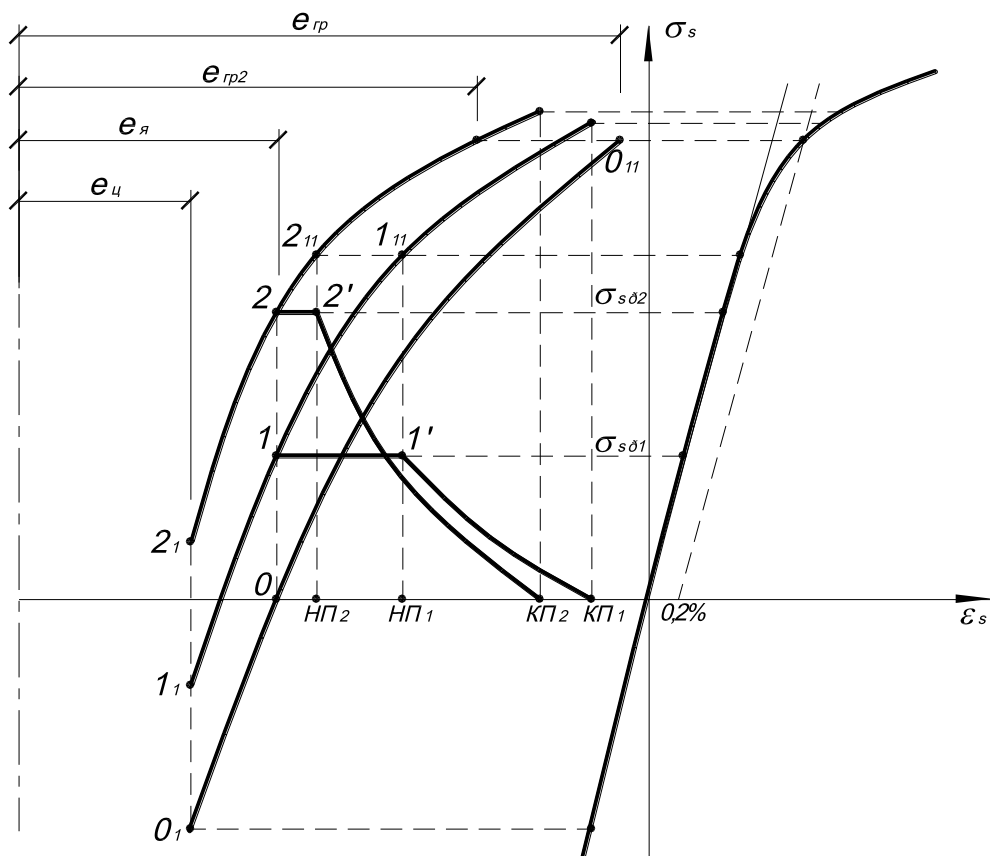


Рис. 1. Изменения напряжений в арматуре в зависимости от предварительного напряжения и эксцентриситета продольной силы (по [3])

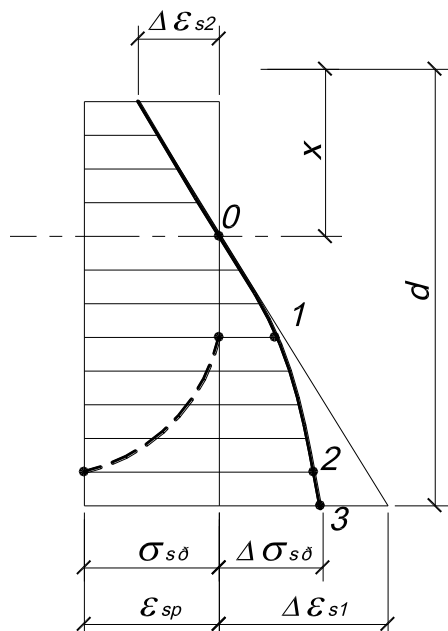


Рис. 2. Напряжения и деформации распределенной по контуру сечения арматуры (по [4])

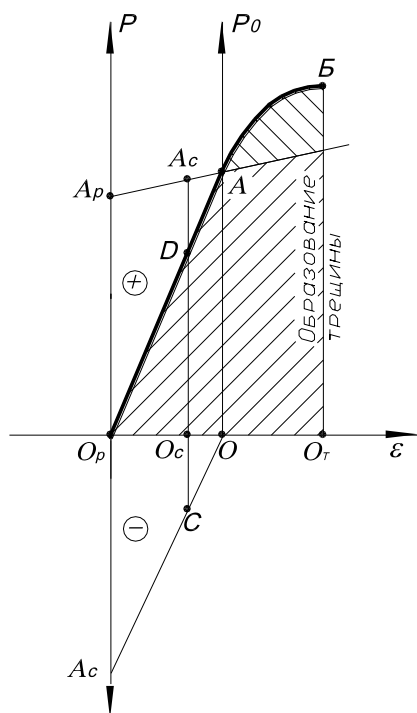


Рис. 3. Диаграмма распределения усилий сопротивления осевому растяжению предварительно напряженного железобетонного элемента (по [5])

Как следует из работ [3 – 5 и др.], усилие предварительного обжатия в предельной стадии конструкции может погашаться внешней нагрузкой частично, полностью или сохраняться неизменным, в зависимости от величины деформации арматурных стержней. Однако физическая сущность процессов погашения предварительного напряжения или предварительного обжатия представляется не вполне ясной, так как рассматриваются в основном условия деформирования арматурной стали. В стадиях приращения деформаций элементов конструкций от внешней нагрузки усилие предварительного обжатия не может сохраниться неизменным, что противоречит классическим законам теории упругости.

С точки зрения теории упругодеформированного тела (рис. 4) предварительно натянутый арматурный стержень получает начальное количество потенциальной энергии, созданное работой внешних сил (натяжных устройств).

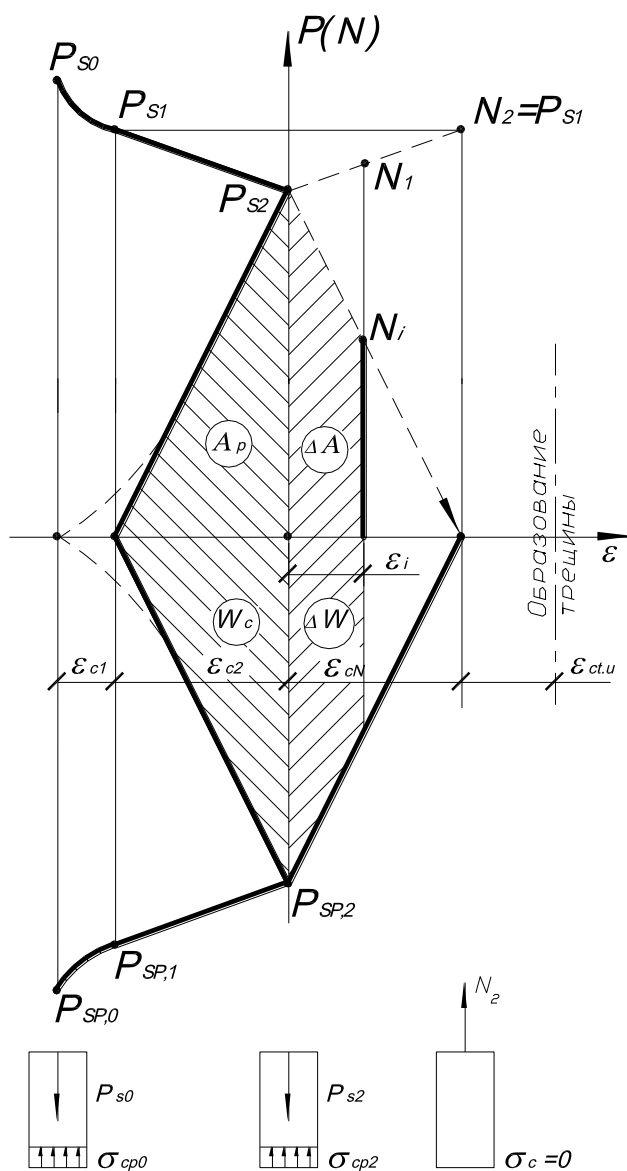


Рис. 4. Состояния железобетонного элемента в стадиях погашения усилий предварительного напряжения:  $A_p$  – работа усилий обжатия;  $W_c$  – потенциальная энергия обжатия бетона;  $\Delta A$  – приращение работы внешних сил, затрачиваемой на погашение усилий обжатия;  $\Delta W$  – приращение потенциальной энергии обжатия бетона;  $\epsilon_{c1}$  – неупругие деформации обжатия бетона;  $\epsilon_{c2}$  – упругие деформации обжатия бетона;  $\epsilon_{cN}$  – приращение деформаций бетона от внешней нагрузки;  $\epsilon_{ct,u}$  – предельная деформация растяжения бетона

При отпуске натяжения сохранившаяся потенциальная энергия проявляется в виде работы, совершаемой внутренними силами поперечных сечений стержня. В более простой интерпретации может быть рассмотрена (рис. 5) физически подобная модель упругодеформированной системы «пружина – натянутый стержень».

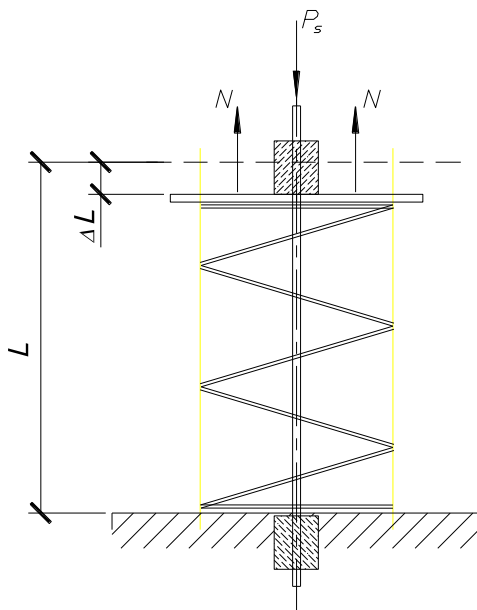


Рис. 5. Модель упругодеформированной системы «пружина – натянутый стержень»

В процессе передачи усилия предварительного напряжения арматуры ( $P_{S0}$ ) на затвердевший бетон работа арматурного стержня ( $Ap$ ) переходит в потенциальную энергию деформаций бетона ( $Wc$ ). Проявление различного рода известных потерь снижает усилие обжатия, сохраняя при этом часть потенциальной энергии предварительного напряжения.

Взаимодействуя, усилия преднапряжения в арматуре ( $P_S$ ) и в бетоне ( $P_C$ ) изменяются на этапах неупругого  $\varepsilon_{C1}$  и упругого  $\varepsilon_{C2}$  обжатия при равенстве усилий  $P_{S0} = P_{C0}$ ,  $P_{S1} = P_{C1}$  до установившегося упругого равновесия  $P_{S2} = P_{C2}$  (ось  $P(N)$ , см. рис. 4).

На основании закона сохранения энергии работа усилий обжатия  $Ap$  равна потенциальной энергии деформаций бетона  $Wc$ , т.е.  $Ap = Wc$ .

Для одноосного напряженного состояния из теоремы Клапейрона и рис. 4 следует:

$$0,5\sigma_{SP2}A_{SP}\varepsilon_{C2} = 0,5\sigma_{SP2}A_S\varepsilon_{C2}$$

или

$$\sigma_{SP2}A_{SP} = \sigma_{SP2}A_S. \quad (1)$$

В результате действия внешней силы  $N_1$  суммарное усилие в арматуре увеличивается, в то время как напряжение в бетоне уменьшается, так как уменьшается усилие его обжатия. Поэтому на участке деформирования  $\varepsilon_{CN}$  всегда существует усилие обжатия бетона  $N_i$  (непогашенное усилие предварительного напряжения) или сохранившаяся потенциальная энергия, характеризующая степень использования предварительного напряжения:

$$N_i = P_{S2} \left( 1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{CN}} \right). \quad (2)$$

В связи с тем, что именно бетон является аккумулятором потенциальной энергии, количество ее в данный момент уменьшается, так как приращение работы  $\Delta A$  полностью переходит в потенциальную энергию, и последняя получает приращение  $\Delta W$ :

$$\Delta A = \Delta W; \quad Ap - \Delta A = Wc - \Delta W. \quad (3)$$

Конечной стадией, когда вся потенциальная энергия будет погашена, является состояние исчерпания работой внешних сил всей потенциальной энергии деформаций бетона (при  $A_p = \Delta A \rightarrow W_c = 0$ ), или при условии:

$$\varepsilon_{C2} = \varepsilon_{CN}. \quad (4)$$

С момента отпуска натяжного устройства и передачи энергии упругих сил стержня на пружину, стержень совершает работу, переходящую в потенциальную энергию деформаций пружины. По закону сохранения энергии, работа стержня  $A$  равна потенциальной энергии сжатой пружины  $W$ . Изменение внутренней энергии тела всегда связано с внешними воздействиями. Внешняя растягивающая сила  $N$  совершает работу внешних сил  $\Delta A$ :

$$A - \Delta A = W_1. \quad (5)$$

Работа внешних сил принята со знаком минус, так как имеет противоположное направление по отношению к работе обжатия, следовательно  $W_1 < W$ .

В связи с тем, что потенциальная энергия не может быть отрицательной, считаем, что при работе внешних сил, равных по величине начальной потенциальной энергии сжатой пружины, усилие предварительного напряжения погашается,  $W = 0$ .

Следовательно, на основании закона сохранения энергии работа упругих сил предварительно напряженного стержня переходит в потенциальную энергию, накапливаемую бетоном при получении им упругих деформаций и возвращаемую обратно в виде работы внешних сил при исчезновении обратимых деформаций.

Представленный анализ состояний железобетонного элемента при взаимодействии внешних и внутренних усилий, в котором показана физическая сущность процессов погашения усилий предварительного напряжения с точки зрения потенциальной энергии упругодеформируемого тела, позволяет сделать следующие выводы:

- 1) сохранившиеся в конструкции усилия предварительного напряжения арматуры следует рассматривать в расчетах, используя формулу (2), как переменные сжимающие силы, зависящие от приращения деформаций бетона при внешнем нагружении;
- 2) усилие предварительного напряжения арматуры погашается по линейной зависимости, пропорционально приращению деформаций бетона от внешней нагрузки;
- 3) стадия полного погашения усилия обжатия достигается при условии (4), соответствующем исчерпанию внешними нагрузками упругих деформаций обжатия бетона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Мин-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Мн., 2003. – 139 с.
2. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М., 1986. – 36 с.
3. Дмитриев С.А. Влияние предварительного напряжения на прочность внецентренно сжатых железобетонных элементов // Теория железобетона. – М., 1972. – С. 89 – 101.
4. Баташев В.М. Прочность, трещиностойкость и деформации железобетонных элементов с многорядным армированием. – Киев, 1978. – 120 с.
5. Михайлов В.В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. – М., 1978. – 383 с.